

⑬ BUNDESREPUBLIK
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES
PATENTAMT

⑫ Offenlegungsschrift
⑩ DE 196 16 922 A 1

⑤ Int. Cl.⁸:
G 02 B 17/08
G 03 F 7/20

⑳ Aktenzeichen: 196 16 922.4
㉑ Anmeldetag: 27. 4. 96
㉒ Offenlegungstag: 30. 10. 97

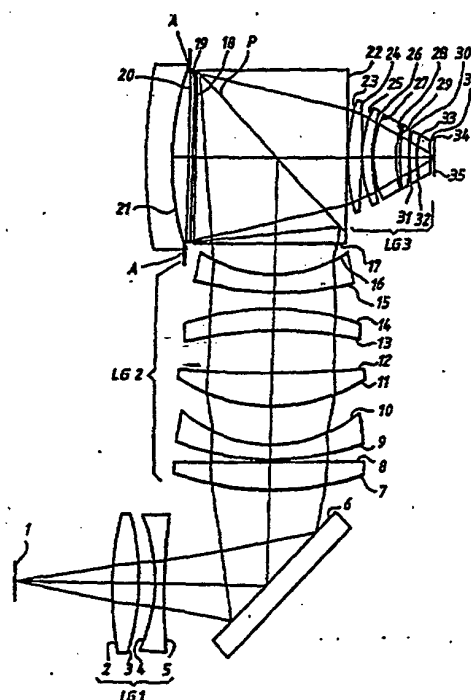
DE 196 16 922 A 1

㉓ Anmelder:
Fa. Carl Zeiss, 89518 Heidenheim, DE

㉔ Erfinder:
Fürter, Gerd, 73479 Ellwangen, DE

⑤④ Hochauflösendes lichtstarkes Objektiv

⑤⑤ Hochauflösendes lichtstarkes Objektiv vom katadioptrischen Typ mit einer Objektebene (1), einer ersten Linsengruppe (LG1) einer zweiten Linsengruppe (LG2), einem Strahlteiler (17, 18, 22, P) einem Konkavspiegel (21), vorzugsweise keinen Linsen zwischen Strahlteiler (17, 18, 22, P) und Konkavspiegel (21), der Systemblende (A) zwischen Strahlteiler (17, 18, 22, P) und Konkavspiegel (21) oder am Strahlteiler (17, 18, 22, P), einer dritten Linsengruppe (LG3), einer Bildebene (35) in der angegebenen Reihenfolge, einem Reduktionsmaßstab (β) von -0,4 bis -0,15, vorzugsweise 0,25, einer bildseitigen numerischen Apertur größer als 0,5, vorzugsweise 0,6 bis 0,75, wobei die erste (LG1) und die zweite (LG2) Linsengruppe insgesamt, vorzugsweise auch die zweite (LG2) Linsengruppe alleine, den Sinus des Randstrahlwinkels reduzieren, und zwar um bis zu 40%.
Bevorzugt wird, daß der Sinus des Randstrahlwinkels ($\sin R_{LG1}$) nach der ersten Linsengruppe (LG1) nicht kleiner als der Sinus des Randstrahlwinkels ($\sin R_{reticle}$) in der Objektebene (1) ist.



DE 196 16 922 A 1

Beschreibung

Die Erfindung betrifft ein hochauflösendes lichtstarkes Objektiv, ausgeführt als katadioptrisches Reduktionsobjektiv mit Linsengruppen, Strahlteiler und Konkavspiegel nach dem Oberbegriff des Anspruches 1.

Derartige Objektive sind als Projektionsobjektiv für die Mikrolithographie mit Strahlung im tiefen UV-Bereich (Wellenlängen 248 nm, 193 nm u. a.) bekannt, z. B. aus US 5,402,226 A und aus DE 44 17 489 A. Bei den genannten Schutzrechten ist die Anmelderin die gleiche wie bei dieser Patentanmeldung und der Erfinder ist zumindest Miterfinder. Der Inhalt dieser Schriften soll Teil dieser Offenbarung sein.

Bei der EP 0 465 882 A stellt das hier in Frage kommende Beispiel der Fig. 2 und Tabelle 1 keine nachvollziehbare Offenbarung dar, da Zeichnung und Tabelle offensichtliche Unterschiede aufweisen und die Daten der Tabelle kein funktionsfähiges Objektiv ergeben.

Bei der US 5,251,070 A (Fig. 4) ist die numerische Apertur mit 0,4 weitaus geringer als erfindungsgemäß vorgesehen, damit sind die Anforderungen an das Objektiv insgesamt entspannt. Der Randstrahlwinkel nimmt vom Objekt — dem Reticle — zum Strahlteiler und Spiegel zu.

Bei US 5,402,226 A ist ein wesentlich verkleinernder Abbildungsmaßstab des Hohlspiegels kleiner als 0,3, im Ausführungsbeispiel 0,14, beim vierfach verkleinernden Objektiv vorgesehen. Beim Ausführungsbeispiel nach Fig. 2 oder 3 und Tabelle 2 mit der numerischen Apertur von 0,58 ist der Sinus des Randstrahlwinkels am Reticle 0,145, nach der ersten Linsengruppe, am (möglichen) Ort des Faltspiegels ca. 0,13 und nach der zweiten Linsengruppe, also am Eingang des Strahlteilers 0,060.

Bei EP 0 608 572 A ist (vgl. claims 1, 2, 25, 27) vorgesehen, daß die jeweils dem Strahlteilerwürfel und dem Konkavspiegel vorangehende Linsengruppe "negative power" in dem Sinne hat, daß die — lokale — numerische Apertur, gleichbedeutend mit dem Sinus des Randstrahlwinkels, erhöht wird. Die vorgelagerten Linsengruppen sind gerade so ausgelegt, daß sie die Eintrittspupille vom Unendlichen in die Systemblende am Konkavspiegel abbilden. Unter anderem kann durch diese Maßnahmen der Büschelquerschnitt am Strahlteilerzugang klein gehalten werden. Dadurch gelangt man zu einem vorteilhaft kleinen Strahlteilerwürfel auch bei großer numerischer Apertur (0,7) des Objektivs.

Aufgabe der Erfindung ist die Bereitstellung eines gattungsgemäßen katadioptrischen Reduktionsobjektivs, bei dem am Eintritt in den Strahlteiler der Randstrahlwinkel und der Büscheldurchmesser, welche in gegenseitiger Abhängigkeit stehen, besonders vorteilhaft sind. Dabei ermöglicht einerseits ein kleiner Büscheldurchmesser einen spezifisch kleinen Strahlteiler, wodurch hohe numerische Apertur ermöglicht wird: Zunächst wird vom Strahlteiler der Raum für die Unterbringung von Linsen nicht zu sehr beeinträchtigt (vgl. US 5,402,267), weiter wird die Herstellung eines störungsfreien Strahlteilers mit schrumpfenden Abmessungen wesentlich erleichtert.

Der andererseits begrenzt bleibende Divergenzwinkel ist eine bedeutende Erleichterung für die Herstellung eines hochwertigen Polarisationsstrahlteilers aus dielektrischen Schichten.

Gleichzeitig soll eine hervorragende Farbkorrektur auch ohne Einsatz von verschiedenen Linsenmaterialien erzielt werden.

Die Aufgabe wird gelöst durch ein gattungsgemäßes Objektiv mit den kennzeichnenden Merkmalen des Anspruches 1, wonach die erste und zweite Linsengruppe insgesamt den Sinus des Randstrahlwinkels reduzieren, und zwar um bis zu 40%. Bevorzugt wird hier ein Bereich bis ca. 30%.

Die Abbildung der im Unendlichen liegenden Eintrittspupille auf die Systemblende im Bereich des Konkavspiegels wird dadurch zwar erschwert, ist aber dennoch möglich.

Zugleich kann dadurch nicht ganz so gut wie bei EP 0 608 572 A, aber doch hinreichend, der aus zwei Prismen zusammengesetzte, etwa würfelförmige Strahlteiler klein gehalten werden. Dies gilt vor allem für die Anwendung des Objektivs in einem Wafer-Scanner, wobei das Bild ein schmaler Schlitz ist.

Wird der Randstrahlwinkel vor dem Strahlteiler insgesamt reduziert, so sind die Randstrahlhöhen vor allem in Strahlteilerhöhe größer, als wenn der Randstrahlwinkel erhöht wird. Außerdem sind die Brechkraften in Strahlteilerhöhe größer. Dies gilt besonders, wenn die zweite Linsengruppe sammelnd, also randstrahlreduzierend, wirkt. Dadurch wird also das Produkt aus Randstrahlhöhe mal Brechkraft im Bereich vor dem Strahlteiler erhöht. Die Korrektionswirkung auf die chromatische Vergrößerungsdifferenz ist aber zu diesem Produkt proportional. Durch diese erfindungsgemäße Ausbildung wird also unabhängig davon, ob zusätzlich Achromatisierung durch zwei verschiedene Linsenmaterialien betrieben wird, eine sehr gute Farbkorrektur erreicht.

Geht die Verkleinerungswirkung über 30% hinaus gegen 40%, so verbessert sich zwar die Farbkorrektur weiter, der Strahlteiler wird aber noch größer, so daß eine numerische Apertur des Objektivs von 0,7 sehr erschwert wird und eher eine NA von 0,6 mit guter Qualität gemacht werden kann.

Die Unteransprüche 2 bis 6 betreffen vorteilhafte Weiterbildungen. Gemäß Anspruch 2 reduziert auch die zweite Linsengruppe den Sinus des Randstrahlwinkels um bis zu 40%. Gewöhnlich ist die zweite Linsengruppe von der ersten durch einen Freiraum getrennt, der geeignet ist zur Anordnung eines Umlenkspiegels. Die oben beschriebene farbkorrigierende Wirkung wird vorwiegend durch die zweite Linsengruppe bewirkt.

Nach Anspruch 3 soll die erste Linsengruppe den Randstrahlwinkel nicht reduzieren, im Gegensatz zur EP 0 608 572 A. Hier soll eher noch eine Erhöhung erfolgen, da dann die beschriebene Farbkorrekturwirkung der zweiten Linsengruppe noch verstärkt wird. Die Abbildung der im Unendlichen liegenden Eintrittspupille auf die Systemblende im Bereich des Konkavspiegels wird auch dadurch nicht beeinträchtigt.

Je weniger optische Elemente zwischen Strahlteiler und Hohlspiegel sind, desto höher kann die numerische Apertur getrieben werden. Besonders störend sind hier freistehende Linsen. Deshalb sollen nach Anspruch 4 keine freistehenden Linsen zwischen Strahlteiler und Hohlspiegel angeordnet sein. Eine Planplatte 19/20 ist aber unvermeidlich, wenn die Lambdaviertelplatte nicht als Dünnschichtpaket auf der Austrittsfläche 18 des Strahlteilers ausgebildet werden kann.

Anspruch 5 zeigt, daß das Objektiv mit nur sieben Linsen in den ersten beiden Linsengruppen vergleichsweise

sparsam aufgebaut werden kann.

Anspruch 6 gibt an, daß der Strahlteiler zuerst in Reflektion benutzt wird. Damit ist für diesen kritischen Kontakt (im Vergleich zur Transmission) die geringe Divergenz der Strahlen vor der Wirkung des Konkavspiegels genutzt.

Anspruch 7 beschreibt ein komplettes Mikrolithographie-Projektionsbelichtungssystem mit einem Projektionsobjektiv entsprechend den vorhergehenden Patentansprüchen. Dieses ist für das tiefe Ultraviolett (Wellenlänge kleiner als 250 nm) ausgelegt und besonders für einen Excimer-Laser mit 193 nm Wellenlänge als Lichtquelle vorgesehen. In diesem Wellenlängenbereich benötigen nämlich bekannte rein refraktive Objektive spektral sehr schmalbandige Laser.

Näher erläutert wird die Erfindung anhand des in der Zeichnung dargestellten Ausführungsbeispiels.

Fig. 1 zeigt einen Linsenschnitt eines erfindungsgemäßen katadioptrischen Reduktionsobjektivs;

Fig. 2 zeigt schematisch eine Mikrolithographie-Projektionsbelichtungsanlage.

Zu dem Ausführungsbeispiel mit dem Linsenschnitt der Fig. 1 gibt die Tabelle 1 die Linsendaten an. Tabelle 2 vergleicht einige wichtige Sinus des Randstrahlwinkels und Abbildungsmaßstäbe des Beispiels mit den Beispielen aus US 5,402,226 A und EP 0 608 572 A.

Tabelle 1

Die Polarisations-Strahlteilerfläche P steht unter 45° zur Achse

Nr.	Radius	Dicke	Glasname
1	∞	111,81	
2	571,30	25,84	Quarz
3	-220,45	17,32	
4	-215,16	12,41	Quarz
5	762,94	114,98	
6	∞	100,00	
7	326,54	30,46	Quarz
8	-15991,4	1,08	
9	295,05	18,88	Quarz
10	166,26	39,75	
11	197,82	37,80	Quarz
12	1373,9	48,16	
13	-407,42	23,18	Quarz
14	-328,40	18,07	
15	420,97	13,36	Quarz
16	143,03	38,46	
17	∞	100,47	Quarz
P		87,21	Quarz
18	∞	2,04	
19	∞	5,10	Quarz
20	∞	15,77	
21	-365,14	15,77	
20'	∞	5,10	Quarz
19'	∞	2,04	
18'	∞	174,42	Quarz
22	∞	1,02	
23	219,50	16,42	Quarz
24	-1096,48	0,76	
25	126,12	11,66	Quarz
26	165,00	0,76	
27	105,25	25,65	Quarz
28	85,75	4,38	
29	153,52	9,69	Quarz
30	3048,63	,51	
31	177,01	7,06	Quarz
32	98,28	1,29	
33	112,73	14,71	Quarz
34	597,26	4,28	
35	∞	0,00	

Der Hohlspiegel 21 ist dabei eine Asphäre nach der üblichen Formel:

$$z = \{1 : [r + r \cdot \sqrt{1 - h^2/r^2}]\} \cdot h^2 + A_4 h^4 + A_6 h^6 + A_8 h^8 + A_{10} h^{10} + A_{12} h^{12}$$

mit r = Scheitelradius, h = Höhe zur optischen Achse und mit den Asphärenkonstanten

$$A_4 = 0,175861 \cdot 10^{-9}$$

$$A_6 = 0,267922 \cdot 10^{-13}$$

$$A_8 = 0,174598 \cdot 10^{-17}$$

$$A_{10} = -0,606697 \cdot 10^{-22}$$

$$A_{12} = +0,769485 \cdot 10^{-26}$$

Die bildseitige numerische Apertur ist 0,70, das Bildfeld ist, einem Wafer-Scanner angepaßt, $26 \times 7 \text{ mm}^2$.

Der Abbildungsmaßstab ist $\beta = -0,25$.

Ausgelegt ist das Objektiv für die Wellenlänge 193 nm eines ArF-Excimer-Lasers.

Zwischen den Flächen 17 und 18 liegt diagonal die Polarisations-Strahlteilerfläche P, die das vom Reticle 1 kommende Lichtbündel reflektiert und um 90° umgelenkt zum Konkavspiegel 21 hinlenkt. Die planparallele Platte mit den Flächen 19 und 20 wird als Lambdaviertelplatte ausgebildet — beispielsweise durch dielektrische Schichten, Spannungsdoppelbrechung oder optisch zweiachsiges Material —, welche dafür sorgt, daß das vom Konkavspiegel 21 rückreflektierte Licht die Strahlteilerfläche P passieren kann zur Austrittsebene 22 des Strahlteilers.

Die Systemblende A sitzt zwischen der Lambdaviertelplatte 19/20 und dem Konkavspiegel 21. Sie kann im Raum zwischen Austrittsfläche 18 und Konkavspiegel 21 auch anderswohin gelegt werden. Mit Hilfe der Systemblende kann wahlweise die numerische Apertur variiert werden. Die Korrektur des gezeigten Objektivs ist darauf ausgerichtet, daß dadurch keine Verschlechterung eintritt.

Zwischen Strahlteiler und Konkavspiegel 21 ist keine Linse vorgesehen, auch nicht als gekrümmte Austrittsfläche des Strahlteilers oder als Manginspiegel.

Das System ist im Beispiel beidseitig telezentrisch.

Eine zusätzliche Lambdaviertelplatte nach dem Austritt 22 aus dem Strahlteilerprisma wie bei EP 0 608 572 A beschrieben ist auch hier möglich. Ebenso kann eine korrigierte Phasenplatte in das Objektiv eingesetzt werden oder mindestens eine Linsenfläche kann mit gleicher Wirkung asphärisch — auch nicht rotationssymmetrisch — feinbearbeitet werden.

Tabelle 2

35

Beispiel aus	Tabelle 1	US 5,402,226 Fig. 2, 3	EP 0 608 572 Ex. 1
$\sin R_{\text{Reticle}}$	0,175	0,145	0,175
$\sin R_{\text{LG1}}$	0,180	0,13	0,116
$\sin R_{\text{LG2}}$	0,165	0,06	0,214
$\sin R_{\text{LG3}}$	0,341	0,42	0,315
β_{21}	0,48	0,14	0,68

50

Dabei sind die $\sin R_x$ jeweils die Sinus des Randstrahlwinkels nach der angegebenen Gruppe x, bei $\sin R_{\text{LG3}}$ jedoch davor.

Die Angaben zu EP 0 608 572 sind mit den dortigen Objektivdaten nachgerechnet.

Im Gegensatz zum Stand der Technik wird der Randstrahlwinkel also vor dem Umlenkspiegel 6, der auch weggelassen werden kann, nicht verringert, sondern noch leicht erhöht. Die zweite Linsengruppe LG2 reduziert dann den Randstrahlwinkel im Unterschied zur EP 0 608 572, jedoch im Vergleich zum üblichen, etwa in der US 5,402,267 (wo er halbiert wird), nur geringfügig um etwa 10%.

Von einer Kollimation am Eintritt in den polarisierenden Strahlteiler P ist die Erfindung also weit weg.

Die Gesamtbetrachtung von $\sin R_{\text{LG2}}$ und $\sin R_{\text{LG3}}$ zeigt aber, daß die Divergenzwinkelanspannung am Polarisationsstrahlteiler P insgesamt vorteilhaft niedrig ist.

Die Ausbildung der zweiten Linsengruppe LG2 ist maßgeblich für die gute Farbkorrektur dieses Objektivs.

Die chromatische Vergrößerungsdifferenz ist etwa 0,2 Promille pro Nanometer Wellenlängendifferenz. Sie ist also hervorragend klein und kompensiert in etwa die Verschiebung des Schwerpunkts durch die Farbkoma, die das entgegengesetzte Vorzeichen hat. Der dominierende Farbfehler ist der Gaußfehler — die chromatische Variation der sphärischen Aberration. Es ist möglich, diesen Fehler zu kompensieren, wenn man gezielt Farblängsfehler mit entgegengesetzten Vorzeichen einführt.

Der Gaußfehler ist eine Art Defokussierung höherer Ordnung und hat daher ähnliche Wirkung wie die

FLEX-Methode (z. B. H. Fukuda et al. IEEE Trans. Electron Dev. 38 (1991), 67–75), bei der die Bildebene mehrmals bei verschiedenen Defokussierungen belichtet wird, um die Tiefenschärfe bei Einsatz kontrastverstärkender Resists zu erhöhen.

Die zulässige spektrale Bandbreite des Excimer-Lasers, die dessen Wirkungsgrad und Lichtstärke entscheidend beeinflusst, ist daher abhängig von der Prozeß-Technik des Anwenders. Sie ist aber in jedem Fall größer als 10 pm.

Dieser Wert ist besonders beachtlich, da die Dispersion von Quarz bei 193 nm fast dreimal größer ist als bei 248 nm.

Eine komplette Mikrolithographie-Projektionsbelichtungsanlage mit Excimer-Laser 44 als Lichtquelle, Beleuchtungsoptik 45, Maske 42 (auch Reticle genannt), auf einem Positioniersystem 421, mit (als erfindungsgemäßes katadioptrisches System ausgebildetem) Projektionsobjektiv 41 und (zu belichtendem) Wafer 43 auf einem Waferpositioniersystem 431 ist in Fig. 2 schematisch dargestellt. Außer dem Projektionsobjektiv 41 sind die Teile und ihr Zusammenwirken gemäß dem bekannten Stand der Technik ausgebildet.

Das Projektionsobjektiv 41 gemäß der Erfindung kann abweichend vom Beispiel der Fig. 1 gestaltet werden, z. B. können Abbildungsmaßstab, numerische Apertur, Bildfeld, Wellenlänge und Bandbreite bedarfsgemäß variiert werden. Dabei kann insbesondere auch eine Achromatisierung durch Verwendung verschiedener optischer Materialien ausgeführt werden. Auch bei 193 nm stehen dafür z. B. noch CaF_2 und LiF zur Verfügung.

Patentansprüche

1. Hochauflösendes lichtstarkes Objektiv mit

- einer Objektebene (1),
- einer ersten Linsengruppe (LG1),
- einer zweiten Linsengruppe (LG2),
- einem Strahlteiler (17, 18, 22, P),
- einem Konkavspiegel (21),
- der Systemblende (A) zwischen Strahlteiler (17, 18, 22, P) und Konkavspiegel (21) oder am Konkavspiegel (21) oder am Strahlteiler (17, 18, 22, P),
- einer dritten Linsengruppe (LG3),
- einer Bildebene (35) in der angegebenen Reihenfolge,
- einem Reduktionsmaßstab (β) von $-0,4$ bis $-0,15$, vorzugsweise $0,25$,
- einer bildseitigen numerischen Apertur größer als $0,5$, vorzugsweise $0,6$ bis $0,75$,

dadurch gekennzeichnet, daß

- die erste (LG1) und die zweite (LG2) Linsengruppe insgesamt
- den Sinus des Randstrahlwinkels reduzieren, und zwar
- um bis zu 40% .

2. Objektiv nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß die zweite Linsengruppe (LG2) für sich allein den Sinus des Randstrahlwinkels um bis zu 40% reduziert.

3. Objektiv nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, daß der Sinus des Randstrahlwinkels ($\sin R_{LG1}$) nach der ersten Linsengruppe (LG1) nicht kleiner als der Sinus des Randstrahlwinkels ($\sin R_{\text{Reticle}}$) in der Objektebene (1) ist.

4. Objektiv nach mindestens einem der Ansprüche 1, 2 oder 3, dadurch gekennzeichnet, daß zwischen Strahlteiler (17, 18, 22, P) und Konkavspiegel (21) keine freistehende Linse angeordnet ist.

5. Objektiv nach mindestens einem der Ansprüche 1–4, dadurch gekennzeichnet, daß die erste (LG1) und zweite (LG2) Linsengruppe zusammen nicht mehr als sieben Linsen aufweisen.

6. Objektiv nach mindestens einem der Ansprüche 1–5, dadurch gekennzeichnet, daß am Strahlteiler (P) das Licht von der zweiten Linsengruppe (LG2) kommend reflektiert wird.

7. Mikrolithographie-Projektionsbelichtungsanlage mit einer Lichtquelle, die Strahlung im tiefen Ultraviolett abgibt, insbesondere einem Excimer-Laser, enthaltend ein Projektionsobjektiv mit den Merkmalen von mindestens einem der Ansprüche 1–6.

Hierzu 2 Seite(n) Zeichnungen

FIG. 1

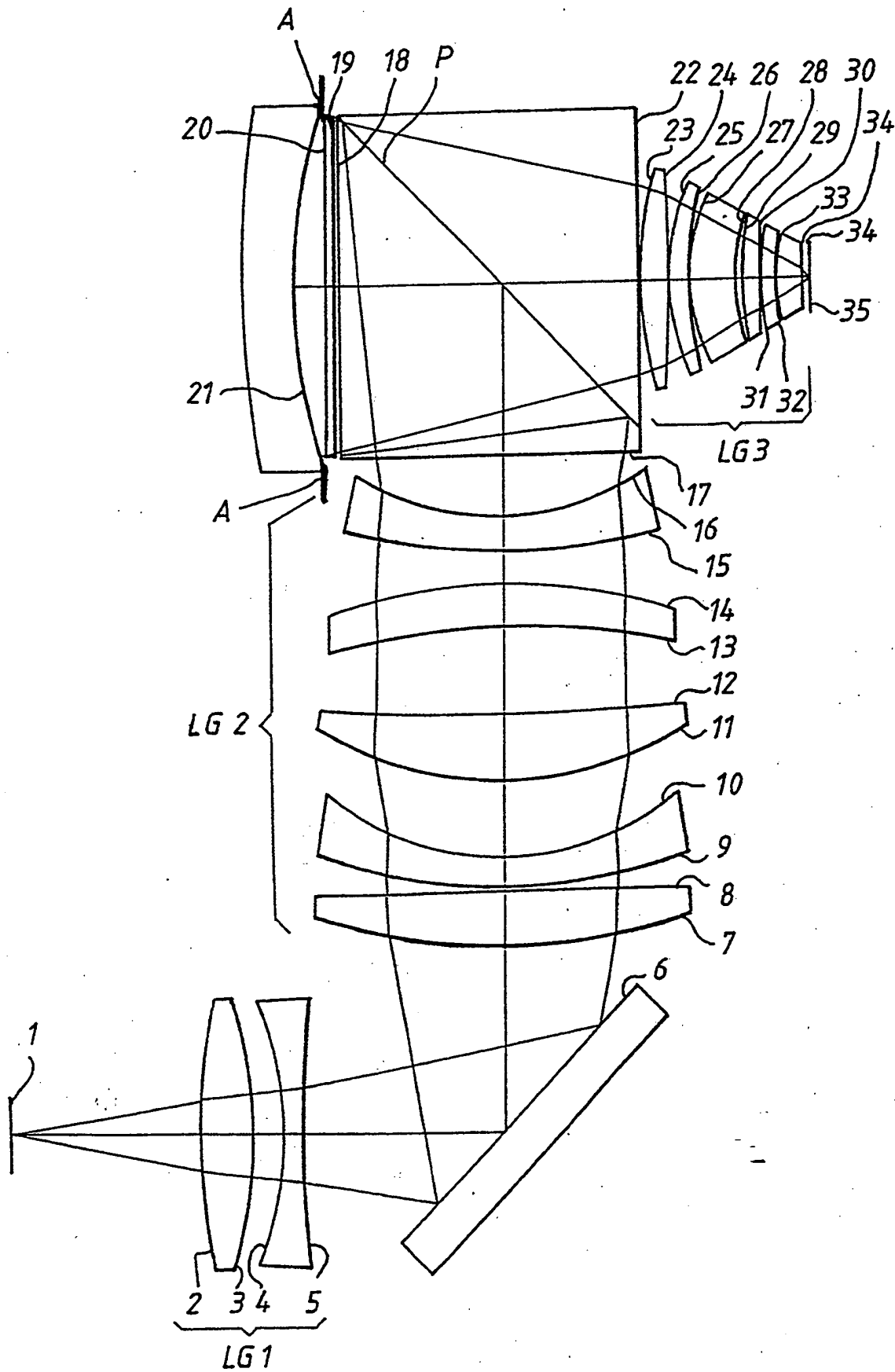


FIG. 2

